

УДК 62-50:658.564:621.924

Ю.В. Петраков, д-р техн.наук, проф.,
НТУ України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В МАШИНОБУДУВАННІ УКРАЇНИ

В статье установлена основная проблема современных САМ-систем, которая состоит в отсутствии учета процесса резания при обработке деталей на станках с ЧПУ. Предложены методы совершенствования, основанные на специальном представлении геометрии детали в виде цифровых массивов, предварительном моделировании процесса срезания припуска, перманентном решении задачи оптимизации и учете упругих деформаций технологической обрабатывающей системы.

The basic problem of the modern CAM-systems, which consists in absence of account of cutting process at machining of details on machine-tools with CNC, is set in the article. Methods are offered perfections, based on the special presentation of geometry of detail as digital arrays, preliminary simulation of removal process of allowance, permanent decision of optimization task and account of resilient deformations in the technological machining system.

Актуальність. Суттєве ускладнення завдань обробки на верстатах з ЧПУ привело до появи спеціальних комп'ютерних САМ-систем (Computer Aided Manufacturing). Першими розробниками таких систем були програмісти і фахівці з нарисної геометрії, тому що головним завданням було забезпечення автоматизації проектування траєкторій формуютьовуючих рухів, тобто відтворення форми деталі, отриманої з САД-системи (Computer Aided Design). Зовсім не бралось до уваги, що таке відтворення завжди відбувається в пружній технологічній оброблюючій системі (ТОС) з певними швидкостями руху. Призначення режиму різання (швидкості, глибини різання і подачі) повністю віддано на розсуд технолога-програміста, не зважаючи на очевидну квазістаціонарність умов різання за формуютьовуючою траєкторією. Традиційно збереглася тенденція до скорочення кількості інформації у програмі, застосування циклів обробки, які вже називалися «стратегіями».

Таким чином, не зважаючи на появу нових засобів проектування управляючих програм, нових носіїв інформації у вигляді *flash-пам'яті*, потужних комп'ютерів у верстатних системах ЧПУ, основні підходи до проектування програм залишилися незмінними. В нових умовах практично необмежених можливостей за кількістю інформації в управляючій програмі, розвитку досліджень процесу різання в замкненій ТОС такий стан речей стає анахронізмом, що стримує повне використання функціональних можливостей сучасного металообробного обладнання з ЧПУ.

Слід зауважити, що проектування управляючих програм з використанням циклів широко застосовується виробниками металообробного обладнання з ЧПУ і надається в інструкціях оператора-програміста. Однак, відмова від використання для технологічної підготовки САМ-систем завжди приводить до втрати продуктивності, бо за інструкцією оператора-програміста програмування відбувається безпосередньо на стійці верстату, який в цей час не працює.

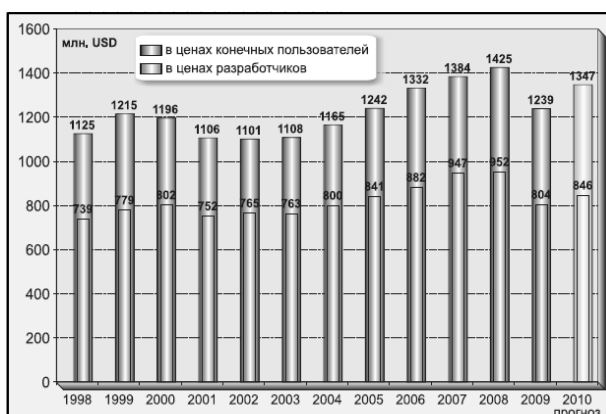


Рис. 1. Динаміка світового ринку САМ-систем

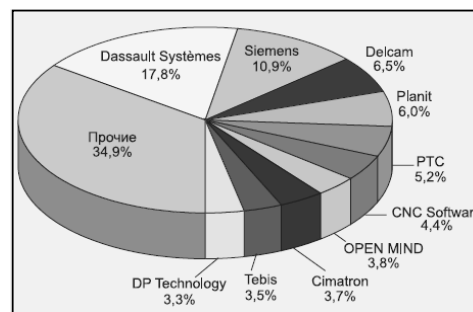


Рис. 2. Розподіл ринку САМ-систем на 01.01.2010р.

Проте, сучасний ринок САМ-систем розвивається і, як частина світового ринку САД/САМ/САЕ/РДМ-систем, адекватно реагує на зміни темпів розвитку світової економіки [1]. У 90-ті роки ринок досить стабільно зростає, додаючи щорічно близько 100 млн. дол., а на початку нового тисячоріччя втратив з причини світової економічної кризи. Наразі, починаючи з 2003 року, ринок САМ-систем знову показує зростання (рис.1).

Крім зниження ділової активності у промисловій сфері, серед головних причин скорочення ринку САМ-систем називають різке зменшення обсягу продажу верстатів з ЧПУ: у 2009 році обсяги продаж (у грошовому еквіваленті) скоротились на 32% у порівнянні з 2008 роком. За розмірами доходів від продажу ліцензій САМ-систем у 2009 році лідером залишається французька компанія *Dassault Systemes*, друге місце займає *Siemens PLM Software*, а на третє місце вперше вийшла англійська компанія *Delcam* (рис.2).

Провідні компанії-виробники САМ-систем прикладають чимало зусиль для впровадження своїх продуктів у навчальний процес (рис.3 а), усвідомлюючи, що такий шлях приводить до збільшення проданих у промисловість ліцензій. Так, *Mastercam*, що займає перше місце за кількістю наданих у сферу освіти робочих місць, у 2009 році зайняв перше місце по кількості встановлених робочих місць у промисловості (рис.3, б). Аналіз наданих показників свідчить, що на перших місцях (рис.3) майже відсутні так звані *high-end*-системи (*CATIA*, *Pro/Engineer*), крім системи *NX*, зате відносно молоді компанії, які прискорюють свій розвиток, наприклад, *Delcam* (*PowerMill*, *FeatuteCAM*), швидко зрозуміли корисність такої сторони бізнесу.

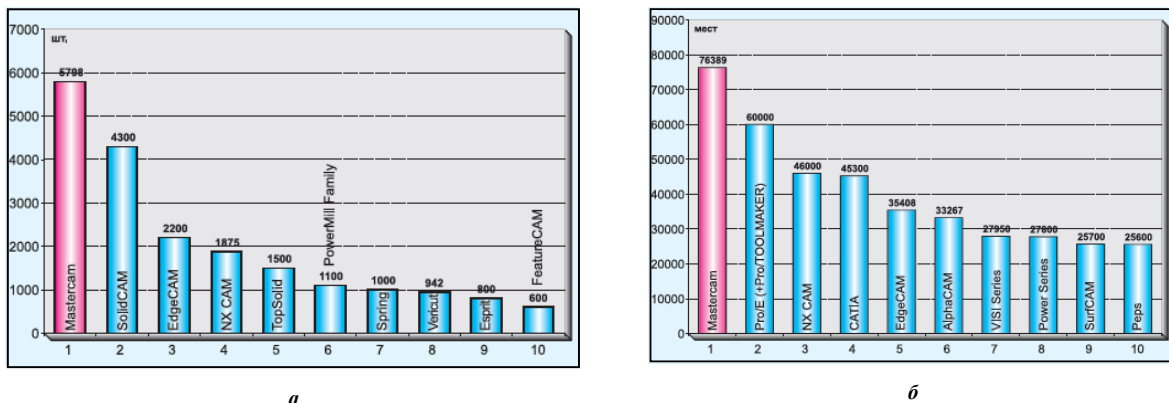


Рис. 3. Розподіл САМ-систем за кількістю наданих робочих місць у 2009 році:
а) – у сферу освіти, б) – у промисловість

Таким чином, склалася ситуація, коли на ринку САМ-систем відбувається жорстка конкуренція, яка далі буде тільки посилюватись, а у напрямку удосконалення фірмами-виробниками застосовуються непринципові зміни зі збільшення стратегій, покращення інтерфейсів, упорядкування баз даних тощо. На цьому тлі особливої актуальності набувають роботи спрямовані на надання нової якості інтегрованим CAD/CAM-системам, що, у співпраці з відомими фірмами-виробниками, можуть бути втілені у реальний програмний продукт нового покоління.

Постановка завдання. Процес підготовки управляючих програм для верстатів з ЧПК за допомогою більшості інтегрованих CAD/CAM-систем полягає в поетапному виконанні процедур, що представлені на рис.4. Першим етапом технологічної підготовки є проектування креслення деталі і (в деяких системах) заготовки. Таке проектування в інтегрованих системах відбувається всередині і закінчується створенням файлу, що містить повний опис даних про геометрію деталі, використовуючи внутрішній формат баз даних CAD/CAM-системи. Якщо файл креслення деталі імпортується з іншої CAD-системи, то використовуються спеціальні програми-транслятори. Наразі з'явилися нові програми прямого імпортування, побудовані на технології «one-step data transfer», завдяки яким одним кліком миші виконується імпорт CAD-файлу в окрему САМ-систему.

В напрямку вдосконалення CAD-частини спостерігається значний прогрес. Наразі будь-яка САМ-система має

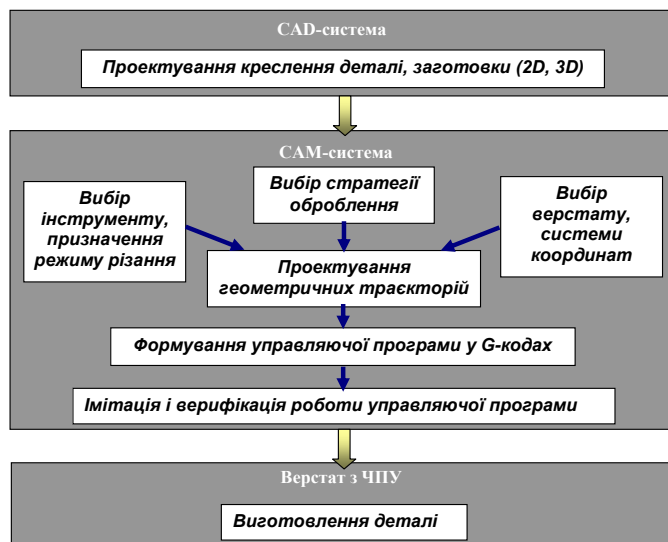


Рис. 4. Алгоритм проектування управляючих програм

засоби 3D-каркасного проектування, апарат швидкого фарбування поверхонь, керування джерелом освітлювання, динамічне обертання у просторі, віконні операції, перетини тощо. Крім того, великим плюсом є наявність функцій автоматичного гладкого спряження поверхонь, сплайнових операцій. Сьогодні багато САМ-систем спроможні імпортувати твердотільні моделі деталей з CAD-систем, а потім, використовуючи ці дані, згенерувати відповідні управляючі програми, хоча деякі експерти [2] схильні стверджувати, що твердотільні моделі зручні для опису простих деталей та на концептуальній стадії проекту, а каркасні – для програмування обробки на верстаті з ЧПК.

Далі файл деталі передається в САМ-систему, де і виконується автоматизоване проектування управляючої програми. Тут багато важливих етапів віддано на розсуд технолога-програміста. З запропонованого меню він обирає стратегію виконання траєкторій формують рухів, що має

бути пов'язана з обраною системою координат відповідного верстату, обирає інструмент, його геометрію і призначає режим різання. Такі важливі для майбутнього процесу параметри обираються з власного досвіду, довідників або рекомендацій фірми-виробника інструменту.

Слід зауважити, що деякі фірми вбудовують функцію підказок при призначенні режиму різання, називаючи таку опцію «автоматичним призначенням оптимального режиму різання» [3]. Проте аналіз такої опції показує, що знов-таки йдеться всього лиш про режим, який рекомендований виробником інструменту і ніякої оптимізації не відбувається. Єдине, що відбувається в САМ-системі насправді автоматично – це проектування траєкторій формоутворюючих рухів, хоча і у відповідності до обраних «вручну» стратегій, координат, інструменту тощо. Далі, за обраним постпроцесором верстату з ЧПК відбувається автоматична генерація управляючої програми у відповідних кодах, наприклад, у G-кодах.

В сучасних САМ-системах набуває постійного розвитку модуль імітації функціонування вже створеної програми з її верифікацією. Тут започатковані і постійно додаються все нові і нові опції (Integrated Tool Path Verification), включаючи модулі 5-ти осьової верифікації. Програміст під час імітації може повертати деталь на екрані дисплея, щоб наочно перевірити траєкторію руху з будь-якої сторони деталі, відсутність грубих колізій, що, як стверджується [2] усуває потребу в пробних прогонах управляючої програми на верстаті (dry runs on the NC machine).

Удосконалення САМ-систем відбувається в основному за рахунок включення різних опцій, що спрямовані на виключення недоліків розрахунку траєкторій формоутворення та холостих рухів. При аналізі формоутворюючих траєкторій застосовуються опції усунення зняття зайвого матеріалу (Gouge Avoidance), захист від погано спроектованих моделей (Edge Protection of Less-Than-Perfect Models), обробка залишків (REST Machining) тощо. При аналізі холостих рухів увага приділяється в основному на усунення колізій зіткнення інструменту з частинами верстату або пристрою.

Слід відзначити певний прогрес однієї компанії *CGTex*, яка в своєму програмному продукті *Vericat* втілює деякі методи по управлінню процесом різання, а саме у модулі *OptiPath* розраховується закон управління подачею, виходячи з концепції: більше припуск, що зрізується – менша подача. Ураховуючи розповсюдженість на ринку традиційних САМ-систем відомих фірм, компанія *CGTex* пропонує крім використання окремо, підключення свого програмного модуля *OptiPath* до них.

Проведений аналіз дозволив встановити основні недоліки існуючих САМ-систем.

1. Проектування деталі в САД-системі відбувається без урахування кінематичної схеми формоутворення на верстаті, що викликає певні неузгодження в управляючій програмі.
2. Вибір стратегії обробки та проектування траєкторій чорнових переходів виконується технологом-програмістом на деяких евристичних прийомах та інтуїтивному призначенні глибини різання, яка визначатиме відстань між траєкторіями.
3. Режим різання призначається технологом-програмістом виходячи з довідників, власного досвіду або рекомендацій фірми-виробника інструменту, причому застосування циклів у САМ-системах позбавляє можливості управління режимом різання всередині циклу.
4. Відсутні будь-які спроби урахування пружних та динамічних властивостей ТОС, в якій відбувається процес різання.

Відмічені недоліки приводять до того, що часто використовуються далеко не оптимальні схеми формоутворення, іноді з необґрунтованим збільшенням кількості керованих координат верстата з ЧПУ, виникають помилки при переході з Декартової системи до полярної і навпаки. Необґрунтований вибір стратегій може привести до втрати продуктивності, а проектування траєкторій холостих переміщень не ураховує динамічні характеристики таких траєкторій, що може привести до зупинки верстату в деяких точках. Відсутність модулів автоматичного призначення режиму різання викликає значне збільшення витрат і часу на технологічну підготовку виробництва, зменшується продуктивність верстата з ЧПУ, а для забезпечення необхідної якості обробки, як правило, застосовується метод «проб і помилок».

Таким чином, проведений аналіз функціональних можливостей існуючих систем та накопичений досвід кафедри технології машинобудування НТУУ «КПІ» в царині управління процесами різання на верстатах з ЧПУ, дозволяє сформулювати наступні основні завдання з удосконалення інтегрованих САД/САМ-систем. По-перше, це – створення інтегрованих САД/САМ-систем машинобудівного виробництва, що здатні за видами оброблення (точіння, фрезерування, шліфування тощо) в автоматичному режимі проектувати управляючі програми для відповідних верстатів з ЧПК, включаючи автоматичне призначення оптимального режиму різання. По-друге – запрограмоване управління має забезпечувати виконання наступних задач: спочатку стабілізація умов різання, потім оптимізація процесу обробки, а потім корекція формоутворюючої траєкторії.

Вирішення завдання. Для удосконалення процесу підготовки управляючих програм верстатів з ЧПК у відповідності до поставленої задачі пропонується методика, яка базується на фундаментальних поняттях технології машинобудування, теорії різання, динаміки верстатів тощо, з використанням нових розроблених чисельних процедур моделювання.

Процес формоутворення на будь-якому верстаті завжди виконується в пружній технологічній системі, на яку впливають різноманітні збурення, що заважають досягненню мети управління. На етапі проектування технологічної операції по наявній моделі процесу можуть бути визначені більшість детермінованих збурень, або хоч б найбільш сильні з них. Далі, при виборі управліннь, якими найчастіше є параметри режиму різання, застосовують два принципово різних підходи.

Перший передбачає вибір постійних значень параметрів режиму, які призначають виходячи з того, щоб при якнайгіршому поєднанні збурень отримати придатну деталь. Другий підхід полягає в безперервному управлінні режимами відповідно до відомих принципів автоматичного регулювання. Перший підхід в даний час можна сміливо вважати анахронізмом, хоча саме він і використовується в сучасних САМ-системах.

Отже, перший підхід, який найчастіше застосовувався на практиці завдяки своїй простоті, приводить до велими істотних втрат продуктивності обробки. Причому втрати будуть тим більше, чим більше діапазон коливання збурень і чим сильніше їх вплив на технологічну систему. Наприклад, при обробці складних поверхонь деталей, які характеризуються зміною умов обробки за формуювальною траєкторією в десятки разів, ці втрати досягають 200-300% основного часу. Тому, при виборі параметрів режиму різання, разом із завданням оптимізації всього процесу, необхідно вирішувати задачу компенсації або стабілізації збурень, які діють на систему, що дозволить максимально наблизити процес до стаціонарного. Таким чином, ці два завдання взаємозв'язані, оскільки збурення значною мірою визначають обмеження області можливих значень управління, а також закони або алгоритми управління.

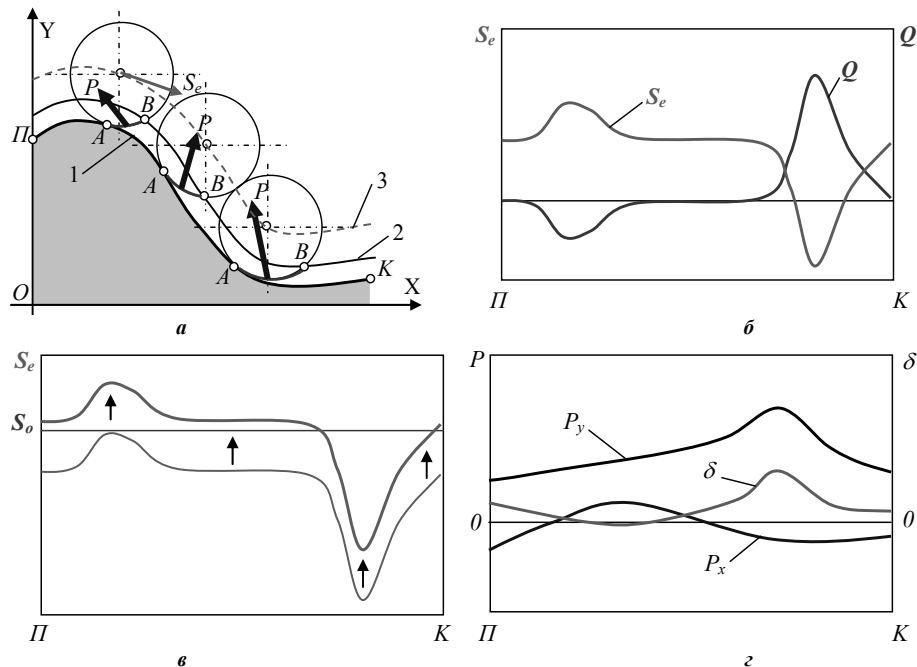


Рис. 5. Приклад управління при контурній обробці

Як вже відмічалось, найсильніше ці збурення діють при обробці складних поверхонь, коли до традиційних збурюючих чинників, а саме: зміні припуску, фізико-механічних властивостей матеріалу заготовки, інструменту і тому подібне, додаються збурення, пов'язані з складним відносним формуювальним рухом інструменту і деталі і безперервною зміною параметрів шару припуску, що зрізується [4].

Як ілюстрація висунутих положень пропонується приклад формування управління при контурній обробці будь-яким інструментом, що має початкову інструментальну поверхню у вигляді циліндра. На рис.5, а представлений процес формоутворення різанням контуру 1 деталі (П – початок, К – кінець контуру), коли заготовка має абсолютно еквідистантний припуск (лінія 2). Виходячи з геометричних умов формоутворення, центр інструменту рухається по еквідистанті 3 до оброблюваної поверхні. Ясно, що умови силової взаємодії інструменту і заготовки визначатимуться параметрами шару припуску, що зрізується, залежними від дуги контакту AB , довжина і розташування якої при різних положеннях інструменту істотно розрізняються. Тому вектор P сили різання також змінює свою величину і напрям в площині YOX . Вектор сили різання на рис. 5., а зображений в припущенні руху по еквідистанті з постійною подачею S_e .

Відомо, що майже для всіх видів обробки головним чинником, що визначає якість обробленої поверхні, є інтенсивність Q зрізування припуску, яка залежить від довжини дуги контакту. На рис.5, б показаний графік зміни цього найважливішого параметра процесу різання по розгортці довжини еквідистанти. Видно, що процес є квазістаціонарним, і це обов'язково приведе до істотної зміни властивостей обробленої поверхні за її довжиною (шорсткість, фізико-механічні властивості поверхневого шару тощо). Оскільки інтенсивність зрізування припуску залежить також і від подачі S_e по еквідистанті центру інструменту, з'являється можливість стабілізувати інтенсивність зрізування припуску за рахунок управління цією подачею. Передбачуваний закон управління подачею S_e по еквідистанті для даного випадку представлений на рис.5, в. Він впливає з умови максимального наближення умов контурної обробки до умов обробки поверхні постійної кривизни. В результаті інтенсивність зрізування припуску на всіх ділянках контуру буде однаковою.

Тепер настає черга виконання головної мети управління: мінімізувати час обробки. Тут, безумовно, повинне вирішуватися завдання оптимізації, бажано в такому формулюванні, яке дозволяє вважати її однокритеріальною. Наприклад: вибрати такий рівень зміни подачі S_e по еквідистанті (тобто її «середню» величину S_0), щоб при максимальній продуктивності задовольнялися всі умови точності і якості обробленої поверхні. На рис.5, в позначений можливий метод вирішення такої задачі за рахунок переміщення отриманого закону управління подачею S_e в положення, відповідне оптимальному рівню «середньої» подачі S_0 . Оптимальна величина «середньої» подачі визначається при вирішенні стандартної задачі нелінійного програмування як для поверхні постійної кривизни.

Проте таке управління хоча і приводить до вирівнювання умов різання по контуру і оптимізації процесу за прийнятим критерієм (мінімальний час обробки), але не може повністю стабілізувати силу різання з причини різного впливу інтенсивності і подачі на силові і якісні характеристики процесу. Крім того, взагалі не слід чекати стабілізації складових P_x і P_y сили різання хоч би унаслідок зміни напрямку вектора сили в площині XOY (рис.5, г). На додаток, жорсткості пружної ТОС по різних напрямках завжди різні і пружні деформації, викликані складовими сили різання, також різні. На формування похибки δ обробки, яка вимірюється по нормалі до контуру, ці пружні деформації впливають по-різному. Все це приводить до необхідності вводити третю дію, що управляє, у вигляді корекції траєкторії руху центру інструменту, яка вже не буде еквідистантною.

Розглянутий приклад переконливо показує, що формування управління, для будь-якого процесу обробки різанням повинне здійснюватися в наступній строгій послідовності:

1. Стабілізація умов різання.
2. Оптимізація процесу різання.
3. Корекція формуютьральної траєкторії.

Слід відмітити, що не для всіх процесів різання всі перераховані пункти обов'язкові до виконання. Наприклад, при обробці гладкої циліндричної деталі точінням при евідистантному припуску, стабільність умов різання по ходу формоутворення забезпечена самою конфігурацією деталі і способом обробки. Проте, можна з упевненістю стверджувати, що два перших пункти обов'язкові завжди.

Запропонована методика передбачає зовсім іншу структуру побудови основного алгоритму проектування управляючих програм в інтегрованих CAD/CAM-системах (рис.6).

В CAD системі має відбуватися перетворення геометричних образів, з яких складається поверхня деталі, у цифрові масиви, розраховані з обраним кроком для вибраної системи формоутворення відповідного верстату. Причому перетворення виконується з урахуванням координатної системи верстату, на якому буде оброблятися деталь. Завдяки такому представленню створюється модель деталі, яка є універсальною, а отже подальші процедури з такою моделлю також можуть бути універсальними, незалежно від способу первинного представлення моделі деталі. В цьому полягає перша відмінність САМ-системи, що пропонується, від існуючих.

Друга відмінність полягає у застосуванні нових підходів для вирішення задачі оптимізації для визначення оптимальної глибини різання на чорнових проходах за критерієм мінімального часу обробки. Розв'язання такої задачі потребує деяких параметрів верстату та інструменту, які вводяться в САМ-систему технологом-програмістом. Визначення оптимальної глибини різання дозволяє визначити, шляхом попереднього моделювання і простого порівняння результатів, оптимальну стратегію обробки, тобто траєкторію руху, за якою час обробки буде мінімальним.

На цьому етапі вирішується також задача оптимізації холостих рухів при переході інструменту на новий прохід за критерієм мінімальних прискорень, що дозволяє уникнути колізій зупинки верстату та невиправданих динамічних навантажень на приводи ЧПУ [6]. В такому підході полягає третя відмінність запропонованої САМ-системи.

Далі включається основний модуль САМ-системи, який виконує моделювання процесу оброблення і на кожному кроці одночасно вирішує три задачі: визначає аналог інтенсивності зрізування припуску, стабілізацію умов оброблення за регулюванням подачі та швидкості різання і оптимізацію всього процесу за критерієм мінімального часу оброблення. Моделювання супроводжується візуалізацією процесу оброблення, проте це не є візуалізація функціонування готової програми управління як в існуючих САМ-системах, а навпаки, при такому моделюванні і створюється, причому автоматично, проміжний файл управління CLDATA з даними не тільки координат геометричної траєкторії, а й управління у кожному кроці – швидкості різання і подачі. При необхідності виконання корекції формуютьральної траєкторії така процедура, що побудована з урахуванням замкненості процесу різання [7], підключається до етапу моделювання: на кожному кроці визначаються силові

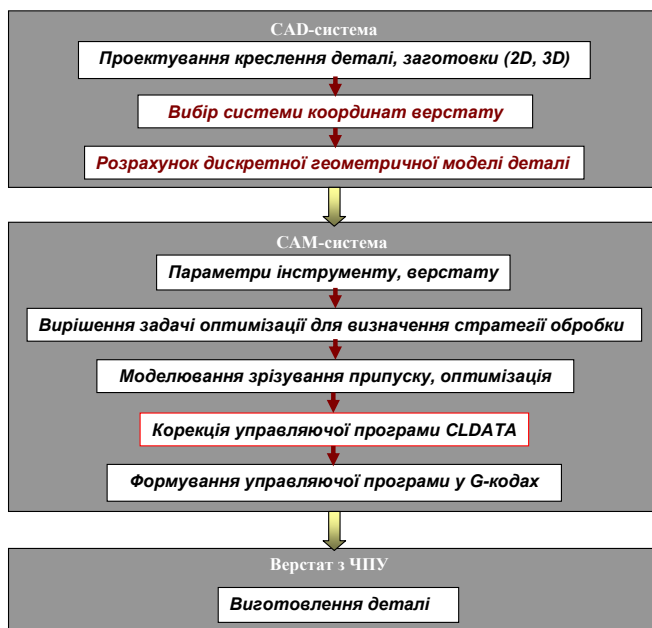


Рис.6. Новий алгоритм проектування управляючих програм

характеристики процесу, пружна деформація ТОС і вноситься корекція в геометричну інформацію.

Сформований файл управління транслюється у коди системи ЧПУ верстату, причому в основному тілі програми використовуються тільки команди G00 і G01, що дозволяє записати отримані результати з швидкості різання і подачі для перманентного управління процесом різання на верстаті. Звичайно такий файл за розміром виявляється значно більшим, ніж файл, записаний з використанням циклів, проте в ньому відображається вся інформація, отримана в процесі моделювання, а сучасні системи ЧПУ верстатів спроможні оперувати з такими файлами без будь-яких ускладнень.

Запропонований алгоритм і структура інтегрованої САМ-системи знайшли своє втілення в розробках кафедри технології машинобудування НТУУ «КПІ», окремі модулі пройшли промислову апробацію і впровадження, де і підтвердили свою ефективність [7].

Висновки.

1. Доведено, що подальший розвиток інформаційних технологій в машинобудуванні України відбуватиметься в напрямку широкого застосування інтегрованих CAD/CAM-систем, а їх алгоритми мають проектувати не тільки відтворення форми деталі, а й розраховувати оптимальний режим різання, виконувати автоматичну корекцію формоутворюючої траєкторії.
2. Розроблена структура нової інтегрованої CAD/CAM-системи, що вирішує таку науково-технічну проблему. Викладені в статті методи, алгоритми і процедури, безперечно, не є вичерпними і єдино можливими. Однак, запропонований підхід слід вважати таким, що приведе до розв'язання поставлених виробництвом проблем, створення інтегрованих CAD/CAM-систем з новими властивостями.
3. Практична апробація та промислова експлуатація окремих модулів запропонованих САМ-систем довела зменшення часу технологічної підготовки виробництва на порядок, а підвищення продуктивності обробки на верстатах з ЧПУ в 1,5...3 рази.

Список літератури.

1. Суханов Ю. Проект «короли» и «капуста» на рынке САМ / Ж. CAD/CAM/CAE Observer, №1 (61), 2011.-с.22-27.
2. Bryan Diehl. CAD/CAM a la Carte: A modular approach to choosing machining software / CNC Machining Magazine, Vol.5, №16, 2001.
3. САМ-система FeatureCAM 2011: возможности новой версии / Ж. САПР и графика № 10, 2010.-с.44-48.
4. Петраков Ю.В. Пути развития интегрированных САД/САМ-систем в машиностроении / 36. Сучасні технології в машинобудуванні. Вип.3, ХНТУ «ХПІ», Харків, 2009.-с.160-167.
5. Петраков Ю.В. Урахування динамічних характеристик формоутворюючих рухів при проектуванні програми управління для верстатів з ЧПУ / Вісник ЖДТУ, Вип.5, том 2, Житомир, 2007.-с.142-150.
6. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. – УкрНДІАТ, Київ, 2004.-336с.
7. Петраков Ю.В., Пасічник В.А. Проектування формоутворюючих рухів для оброблення складних 3D поверхонь на верстатах з ЧПУ / Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування, №54, 2008.-с.24-30.